

油气井射孔弹及其应用

白锡忠 常 熹 编



石油工业出版社

新到图书
PDG

070138

TE355.9/004

油气井射孔弹及其应用

白锡志 常 燕 编



200470873

石油工业出版社

(京)新登字 082 号

内 容 提 要

本书系统地介绍了聚能射孔弹的设计原理和制造工艺,以及在保护油气层完井中的应用。这是作者在搜集大量国内外有关射孔弹的资料及实验研究成果的基础上为广大石油射孔工作者编写的一本参考书。全书由浅入深地介绍了炸药的聚能效应、射孔弹的设计原理及制造工艺、影响穿透深度的各种因素、炸药及其性能分析,以及安全措施等。最后,还介绍了射孔完井设计方法、完井质量与效果分析等。书中,不仅有理论方面的探讨,还有大量的应用实例。

本书适用于从事油气井射孔弹的设计、制造、使用人员以及现场射孔工作者。同时也适用于与射孔工作有关的工程技术人员以及石油院校有关专业的师生。

• • •

本书第一至八章由白锡忠编写,第九章由常熹编写,全书由蒋学明、周兰庭审定。

油气井射孔弹及其应用

白锡忠 常 熹 编

•

石油工业出版社出版

(北京安定门外安华里二区一号楼)

昌平第一排版厂排版

牛栏山一中印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

•

787×1092毫米 32开本 9 1/4印张 202千字 印1—1,500

1992年5月北京第1版 1992年5月北京第1次印刷

ISBN 7-5021-0708-8/TE·670

定价:2.00元

序

油气井射孔是石油勘探与开发中的一项关键技术，也是油气井完井作业系统工程之一。射孔技术与工艺的完善直接影响到油气井预期的产能，以及能否保护油气层。在聚能射孔弹的制造中，射孔弹的几何形状、材质选择、药型罩及其模具的设计与制造工艺等都影响到射孔质量。只有射孔系数完善的油层的出油量，才能代表地层真正的产能，当然这首先要排除油层被污染的因素。

本书对石油射孔弹的基础知识介绍的比较全面，特别是系统地搜集了从50年代到80年代中通过生产实践所摸索和积累的大量有关石油射孔弹的设计与制造工艺方面的经验。同时，对于射孔完井设计，射孔完井质量与效果分析也用一定的篇幅加以叙述。但对石油工作者来说，火工方面的知识需要更新，尤其是基础知识与工作方法，这些，在本书中也给予了较细致的介绍。作者将本书分为九章，分别叙述了聚能射孔弹设计的关键技术、炸药特性、装药工艺、零部件制造工艺、弹枪的紧配合装配工艺、质量检验、安全要求、效果指标要求、射孔施工设计参数，射孔后油井完善系数，质量与效果分析等，是一本从理论到实践，由浅入深的好书，可供射孔工作人员，研究油井的地质与开发、采油、试井工程人员使用，也可作为石油院校有关专业师生的教学参考书。

蒋学明 周兴庭

1990年6月

目 录

第一章 聚能效应	1
第一节 聚能效应的基本现象	1
第二节 药型罩的变形和金属射流的形成	6
第三节 金属射流的性态和主要参数	9
第四节 有效药量	12
第五节 金属射流的穿孔作用	14
第二章 油气射孔弹的设计	19
第一节 关于技术指标的论证	19
第二节 总体结构设计	20
第三节 装药结构的设计	21
第四节 靶场试验及结果分析	45
第三章 影响穿深因素的分析	50
第一节 装药结构对穿深的影响	50
第二节 隔板对穿深作用的影响	52
第三节 装药工艺的影响	54
第四节 药型罩对穿深作用的影响	55
第五节 弹壳对穿孔作用的影响	62
第六节 炸高对穿深的影响	63
第七节 传爆方式对穿深的影响	65
第四章 炸药	66
第一节 爆炸	66
第二节 炸药的分类	72
第三节 单质炸药	72
第四节 混合炸药	79

第五节	油气井射孔弹用耐热混合炸药	83
第五章	炸药性能参数的测定	87
第一节	炸药的热感度	87
第二节	炸药的机械感度	91
第三节	爆热的测定	94
第四节	炸药爆温的测定	95
第五节	炸药的比容	95
第六节	炸药爆速的测定	97
第七节	炸药威力的测定	102
第八节	炸药猛度的测定	104
第六章	装药过程及模具设计	108
第一节	装药工艺	108
第二节	散粒体的性质	112
第三节	压装药的基本原理	112
第四节	压装模具的设计	124
第五节	压药工艺简介	131
第七章	冲压药型罩及其模具设计	134
第一节	药型罩的性能要求和工艺	134
第二节	药型罩的冷冲压工艺	136
第三节	药型罩冷冲压工艺设计	150
第八章	静电与安全	158
第一节	静电的一般常识	158
第二节	炸药、雷管和导爆索的静电感度	158
第三节	静电参数测量	159
第四节	静电的危害性	160
第五节	消除静电的安全措施	160
第六节	弹药的管理及安全事项	163
第九章	射孔弹在保护油气层完井中的应用	168
第一节	射孔弹在石油工业中的应用史	168

第二节	射孔完井方法	169
第三节	射孔对油气层损害的分析	176
第四节	利用双模法研究射孔效果	182
第五节	保护油气层的射孔液与射孔方式	195
第六节	射孔器各参数的优化组合	205
第七节	射孔完井设计	214
第八节	射孔完井质量与效果评价	232
附录一	聚能射孔弹装药结构	239
附录二	国内外某些射孔弹的性能	265
附录三	油井射孔弹用火工品结构	276
参考文献		283
石油测井中常用的许用单位与非许用单位换算表		284
后记		287

第一章 聚 能 效 应

炸药爆炸的聚能现象早在18世纪就被发现，当时并未受到重视。在第二次世界大战中，为了对付坦克，交战各国迅速地采用了聚能装药（药柱）这一新弹种，从而成为当时最有效的反坦克弹种。

炸药爆炸的聚能效应除大量地应用于军事上以外，在工程爆破方面的应用也日趋广泛。当采矿和掘进工程遇到特硬矿体和岩层时，用通常的钻眼工具其钻进速度很慢，用聚能装药打孔可以加快钻进速度，同时还可以粉碎矿石。线型聚能装药（药柱）可以用于野外切割钢板、钢裸等；在水下作业中用它切割水下构件，打捞沉船时切割船体。这些都优于其他方法。

在石油工业方面，当油井下完套管之后，要在井内油层部位将套管射穿，并达到一定的技术指标和工艺要求，石油才能从地层中流到井筒内。

从本世纪50年代开始，我国研制成功57-103型射孔弹。目前，在射孔弹的研制、生产方面都具有一定的规模。深信，随着我国科学技术的不断发展，聚能爆炸技术会在石油工业领域得到更广泛的应用。

第一节 聚能效应的基 本现象

为了说明聚能现象，首先看一组实验结果，试验的目的是比较不同的炸药装药结构对钢板击穿的能力。炸药柱与钢

靶的相对位置见图1-1。图中 (a) 为普通的柱形药柱，(b) 为药柱接触端有锥形孔，(c) 为药柱锥形孔上镶一个铜药型罩。以上三种药柱均与靶面直接接触。(d) 为镶有药型罩的药柱离开靶面一定的距离。试验时，以药柱的顶端用8号电雷管起爆。药柱爆炸后钢板的破坏情况见图1-2。

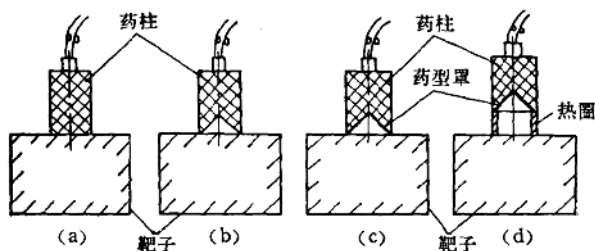


图 1-1 药柱与钢靶的相对位置

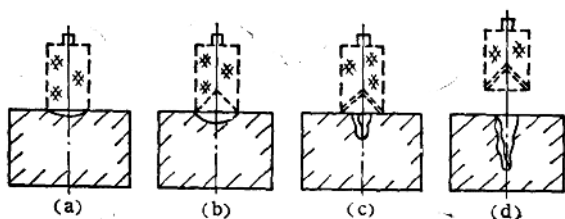


图 1-2 爆炸对钢板的破坏情况

通过以上试验可知，四种药柱爆炸时，虽然都对钢靶产生了破坏作用，但程度很不相同（表1-1）。普通药柱爆炸时，在靶面上只形成一个很浅的凹坑，接触端带锥形孔的药

表 1-1 四种不同形状药柱的爆炸效果

药柱形状	药柱与钢靶相对位置	爆炸效果
普通药柱	接 触	形成浅凹坑
接触端带锥形孔	接 触	形成深的锥形孔 $6\sim7$ mm
锥形孔上镶铜罩	接 触	穿孔深80mm
锥形孔上镶铜罩	距离70mm	穿孔深110mm

柱，其破坏效果明显增大，锥形凹坑的深度可达 $6\sim7$ mm。在锥形孔上镶上药型罩后，破坏程度大大地提高，破甲深度达到无罩药柱直径的11倍以上，将此药柱放在70mm炸高上爆炸时，破甲深度进一步增大，达到无罩药柱直径的17倍以上。把接触端带锥形（或其他形状）孔的药柱对钢板（或其它靶）的破坏作用称为无罩聚能效应。把带药型罩的药柱的破坏作用，称作有罩聚能效应。这两种药柱通称为聚能装药，前者为无罩聚能装药，后者为有罩聚能装药。在以上四种药柱中后三种在药量上都比普通药柱少，而破坏作用反而增大，下面就此进行分析。

一、无罩聚能效应

根据爆轰理论，一定尺寸的药柱在爆炸时，爆炸能量在各个方向上的分布及爆炸作用是不相同的。例如当最简单的圆柱形装药爆炸时，在起爆的前方，其爆炸作用显著增大。药柱爆炸能的空间分布通常与以下几种因素有关：起爆雷管在装药中的位置和雷管的起爆能力；装药外壳的形状、厚度与强度；装药形状等。

无罩聚能装药能增强对45号钢靶的破坏作用，主要在于起爆管的位置以及药柱的特定形状引起爆炸能的重新分配。

其关键是接触面带有锥形孔。无罩聚能装药起爆后，爆轰波到达锥形孔的顶角时，爆轰产物即沿轴线向前飞散。当爆轰波继续前进时，爆轰产物飞散方向均向轴线集中，最后，当爆轰波到达底平面时，所有锥面上的爆轰产物都集中到轴线上。这股产物流通常称作聚能流。聚能流具有很高的速度和密度，如1871型炸药装药形成的聚能流的速度达7000m/s以上。在距药柱锥形孔前方某处，聚能流聚集成一焦点，此处，单位横断面上的能量最大。但是聚能流极不稳定，过了焦点以后聚能流将迅速地向四周扩散，横断面急剧增大，单位面积的能量则迅速减小。当无罩聚能药柱爆炸时，产物流向锥形孔轴线附近集中，结果在钢靶上产生比普通药柱大得多的破坏作用（图1-3）。

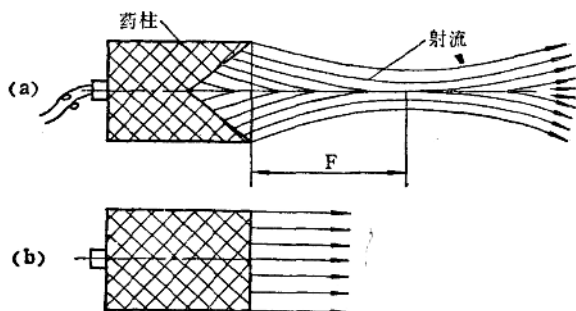


图 1-3 无罩聚能装药与普通药柱的爆炸情况

(a) 无罩聚能药柱；(b) 普通药柱

二、有罩聚能效应

有罩聚能药柱爆炸效应与无罩聚能药柱相比有很大不

同。如图1-4当爆轰波到达药型罩罩面时，罩金属由于受到剧烈的压缩。迅速向轴线运动，速度可达 $1000\sim 3000\text{m/s}$ ，结果在轴线上金属发生高速碰撞挤压，药型罩内表面的一部分金属以很高的速度向前运动。随爆轰波连续地向罩底运动，从内表面连续地挤出向前运动的金属。当药型罩全部被压向轴线以后，最后在轴线上形成一股高速运动的金属射流（金属流）和一个伴随金属射流低速运动的杵体。这种金属射流细长，长径比达200倍，轴线上集中了极高的能量，当它作用于钢靶时，破甲效果远远超过了无罩聚能装药。尾部随金属流运动的杵体速度很低，没有什么破甲作用。当有罩聚能装药离开钢靶一定距离时，给金属射流的延伸创造了有利的条件，故破甲深度还要进一步增大。

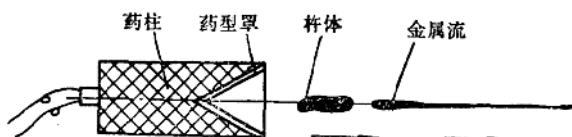


图 1-4 有罩聚能装药爆炸时形成的金属射流和杵体

由此可见，聚能效应是爆炸作用（破坏）的一种特殊现象，它之所以具有破甲作用，根本原因在于能量的集中。无罩聚能装药爆炸时集中的是爆轰产物，虽然速度较高，但单位横断面上集中的能量仍属有限的，故其破甲作用增加的不明显。有罩聚能装药爆炸时，一部分爆炸能转变为金属射流的动能，金属射流的断面积很小，根据实测4S-1型聚能射孔弹金属射流头部的直径仅约 1mm ，而金属射流尾部的直径可达 3mm 。同时，4S-1型射孔弹金属射流头部速度约

6370m/s, 超过了聚能气流的许多倍。因此在横断面上, 能量得到高度集中, 加之金属射流细长, 长径比很大, 这样使其破甲作用远远地超过了聚能气流。

第二节 药型罩的变形和金属

射流的形成

有罩聚能装药破甲作用的关键是依靠药型罩的挤压, 从而形成高速运动的金属射流。

下面简要介绍其形成过程及物理状态。

以WS—85射孔弹聚能药柱为例来分析药型罩的压垮、挤压和金属射流的形成过程。图1-5为WS—85射孔弹聚能药柱, 药型罩为圆锥形, 材料

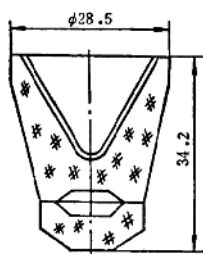


图 1-5 WS—85射孔弹聚能药柱 为紫铜。

当导爆索起爆后爆轰波沿隔板周围的炸药向药柱传播, 结果在药柱中形成喇叭形爆轰波。当爆轰波到达罩顶部时, 顶部的金属由于受到强烈的压缩, 获得向右运动的速度, 如图1-6(a)所示。当爆轰波继续向右运动时, 例如到达药型罩断面1-1处, 则断面1-1以左的罩面被压向轴线, 罩面AB在轴线上发生高速碰撞, 从AB的内表面挤出一股高速运动的金属流, 其余的金属闭合而形成低速运动的杵体, 如图1-6(b)所示。随着爆轰波向右运动, 罩面不断压向轴线, 因而金属流和杵体也不断加长, 如图1-7(a)和(b)所示。当爆轰波到达罩底后, 已经压垮但未到达轴线的罩面在

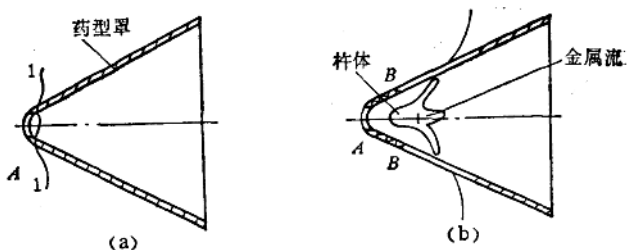


图 1-6 药型罩压垮和金属流的形成过程

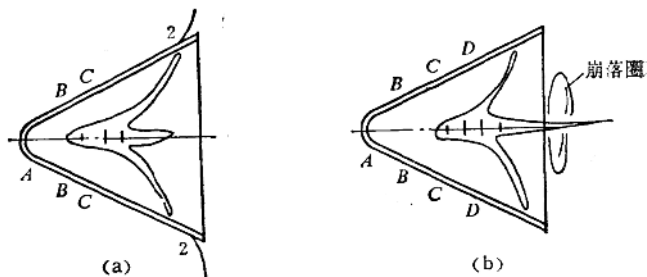


图 1-7 金属射流和杵体不断加长示意图

爆轰产物的作用下仍向轴线运动，最后形成金属射流和杵体，如图1-8(a)所示。由于金属流的速度高于杵体，两者终于相互分离，如图1-8(b)所示。通常较大口径的药型罩只有20~30%的质量形成金属射流，其余的70%~80%都变成杵体，而较小口径的药型罩金属射流的质量所占比例要大一些。必须指出：当爆轰波到达药型罩底时，由于端部卸载，罩的底部将有1~2mm的锥体发生断裂，并以某一速度飞出，此部分的金属不可能压向轴线形成金属射流和杵体，

从而成为向前飞散的崩落圈，如图1-7(b)所示。

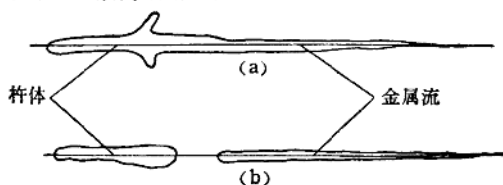


图 1-8 最后形成的金属射流和杆体

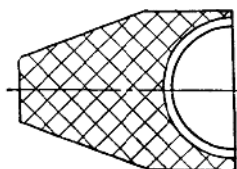


图 1-9 半球形药型罩

如果药型罩为半球形（如图1-9所示的文胜Ⅰ型射孔弹装药），装药从左端起爆，当爆轰波接触罩顶后（图1-10），罩顶部BAB被压向前方，爆轰波运动到C-C断面，罩面不向

轴线集中，不能发生碰撞，而是随BAB一起翻转过来。当爆轰波到达罩底部时，大部分药型罩翻转过来，原来的内表面变成外表面，而外表面则变成内表面。翻转后的药型罩在爆

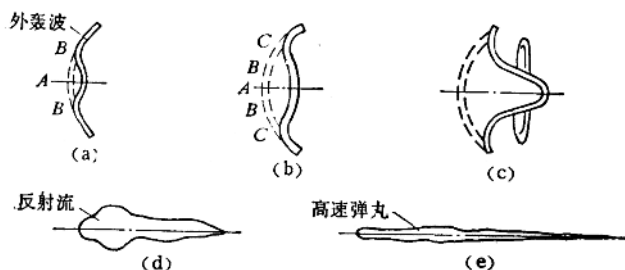


图 1-10 半球形药型罩的变形和高速弹丸的形成过程

轰产物的作用下，逐步向轴线收缩和闭合，一边向前运动一边伸长。在收缩过程中，靠近翻转罩底处压出一小股反向金属流向左运动。这种翻转后又经过收缩的罩体称为高速弹丸。随着高速弹丸的运动，反向金属射流将与高速弹丸断开。之后，由于高速弹丸的不断拉伸，各部分也相互断裂开来。与一般锥形罩一样，底部一部分罩面发生断裂，飞向前方。

第三节 金属射流的性态和主要参数

一、金属射流的性态

通过对X—光高速摄影和在某些介质（沙、水、木屑）中回收的金属射流的分析可知，射流是锥形金属罩内表面很薄的金属层在炸药爆炸的强烈冲击下挤压而成的高速运动体。从回收杆体部分剖面颜色的分析，射流温度在900~1000℃左右。射流头部速度大，尾部速度小，头部温度比尾部温度高。金属罩除部分质量形成射流外，其余部分变成不起破甲作用的杆体，紧跟在高速射流的后面。

二、金属射流的主要参数

1. 射流速度

射流速度可以小于、接近或大于炸药的爆速。这主要决定于炸药性质和装药结构。射流头部平均速度可以用脉冲X—光摄影技术测定。例如通过锥形药型罩变形过程的X—光照片得出，起爆后 $t_1=13.89\mu\text{s}$ 时，射流头部与装药端面（即药型罩底边）间的距离 $d_1=12\text{mm}$ ，到 $t_2=27.25\mu\text{s}$ 时，射流头部与罩边间的距离 $d_2=118\text{mm}$ ，则射流头部平均速度 v_{j1}

$$v_j = \frac{d_2 - d_1}{t_2 - t_1}$$

$$= \frac{(118 - 12) \times 10^{-3}}{(27.25 - 13.89) \times 10^{-6}}$$

$$= 7934 \text{ (m/s)}$$

金属射流的头部速度与罩的材料及锥角等诸因素有关。各种锥角的紫铜罩形成的金属射流头部平均速度值如表1-2所示。所列数据的实验条件为：药柱直径36mm，长50.7mm，炸药为梯恩梯/黑索今50/50（压装），罩厚度0.8mm。不同材料药型罩的射流头部速度值如表1-3所示。实验条件为：药柱直径、长度、炸药、罩厚同上，锥角均为30°。

表 1-2 各种锥角的射流头部速度

药型罩锥角 (°)	射流头部速度 (m/s)
30	7800
40	7000
50	6200
60	6100
70	6700

表 1-3 各种罩材射流头部速度

药型罩材料	射流头部速度 (m/s)
碳钢	7300
硬 钻	8500
紫 铜	7800

2. 射流的质量

锥形罩射流是罩内表面薄层金属经高压冲击挤压而成，